

А. А. Гайнуллина, Р. Р. Галямов, В. В. Кузьмин,
А. В. Чупаев

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ФАКТОРА НЕИЗОТЕРМИЧНОСТИ НА ВЕЛИЧИНУ КОЭФФИЦИЕНТА ИСТЕЧЕНИЯ РАСХОДОМЕРНОГО СОПЛА

Ключевые слова: неизотермичность, коэффициент истечения, расходомерное сопло, измерение расхода.

Проведена теоретическая оценка возможного влияния фактора неизотермичности, обусловленного разностью температур потока контролируемой среды и стенки канала, на величину коэффициента истечения расходомерного сопла. Метод исследования построен на базе современных представлений теории пограничного слоя. Полученные результаты привели к заключению, что неучет указанного фактора в отдельных случаях может привести к погрешности измерения расхода по методу переменного перепада давления порядка 20%. Приведено аналитическое выражение соответствующей поправочной функции.

Keywords: nonisothermal, discharge coefficient, the flow nozzle, flow measurement.

A theoretical assessment of the possible impact of non-isothermal factor caused the difference in temperature controlled environment and the flow channel wall, the magnitude of the discharge coefficient flowmeter nozzle. The method of investigation is based on modern concepts of boundary layer theory. These results led to the conclusion that the neglect of this factor in some cases can lead to an error by the method of flow measurement by differential pressure of the order of 20%. The analytical expression of the adjustment function.

Расходомеры переменного перепада давления в настоящее время продолжают оставаться популярными средствами измерения расхода жидких и газообразных сред [1,2]. Однако, на ряду с большим количеством достоинств они обладают рядом недостатков, одним из которых является чувствительность статических характеристик их первичных преобразователей (сопел, диафрагм и напорных трубок) к трансформации кинематической структуры контролируемых потоков, происходящей под воздействием различных возмущений, таких, например, как неизотермичность и турбулизация потока [3], шероховатость стенок канала, геометрия сужающего устройства и т.п. [4].

В этой связи установление и учет влияния каждого из перечисленных возмущающих воздействий на коэффициент истечения сужающего устройства в отдельности или в совокупности представляет значительный практический интерес.

В частности, в процессе эксплуатации расходомерных устройств могут возникать ситуации, когда температуры рабочих сред отличаются от температур стенок трубы и возникают неизотермические условия, способные оказать существенное влияние на кинематическую структуру контролируемого потока, заметно изменить статическую характеристику расходомерного устройства и тем самым значительно увеличить погрешность измерения расхода. Отсутствие в настоящее время надежных методов учета вышеозначенного фактора на работу расходомеров заметно сужает область их практической применимости.

В данной статье предлагается метод оценки фактора неизотермичности на величину коэффициента истечения расходомерного сопла, основанный на современных представлениях теории пограничного слоя. Его сущность состоит в следующем.

Согласно [5] величина коэффициента истечения расходомерного сопла может быть представлена зависимостью:

$$\alpha = 1 - 2\left(\delta^*/r_0\right), \quad (1)$$

где δ^*/r_0 - толщина вытеснения пограничного слоя в горловине сопла, отнесенная к местному значению радиуса.

Параметр δ^*/r_0 может быть представлен как произведение $\delta^*/\delta \cdot \delta/r_0$, где δ/r_0 - относительная толщина пограничного слоя.

Согласно [6]:

$$\frac{\delta^*}{\delta} = \frac{1}{\chi} \cdot \sqrt{\frac{C_f}{2}} \cdot \left(1 - \frac{1}{4} \frac{\delta}{r_0}\right), \quad (2)$$

$$\frac{\delta}{r_0} = 2 \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2\chi}{\sqrt{C_f/2}} \frac{\text{Re}^{**}_H}{\text{Re} + 4H\text{Re}^{**}}}\right), \quad (3)$$

Анализ выражения (1)-(3) позволяет сделать вывод, что величина коэффициента истечения сопла α является функцией локального коэффициента трения C_f чувствительного к различным внешним возмущениям потока контролируемой среды.

В основу подхода к решению данной задачи положен метод относительного соответствия. Его идея заключается в том, что при определении относительных значений тех или иных физических параметров с заданной степенью точности в большинстве случаев требуется менее точные исходные модели изучаемых явлений, чем при определении абсолютных значений тех же величин. При таком подходе воздействия возмущающих факторов на поток, которые проявляются в изучаемой ситуации, могут быть представлены в виде произведений:

$$C_f = C_{f0} \Pi \psi_i, \quad (4)$$

где C_{f0} - коэффициент трения при «стандартных» условиях течения, характеризующихся отсутствием возмущающих воздействий, а:

$$\psi_i = \left(\frac{C_f}{C_{f0}} \right)_{Re^{**}}, \quad (5)$$

ψ_i - функция, учитывающая влияние каждого конкретного возмущающего воздействия на трение при фиксированном значении параметра Re^{**} .

Таким образом, зная состояние потока газа на входе в расходомерное сопло, зная геометрию сопла и состояние поверхности его проточной части можно по формуле (5) определить ψ_i , а затем по (4) вычислить реальные значения C_f , по формулам (2) и (3) вычислить параметр δ^*/r_0 . Подстановка δ^*/r_0 в (1) дает значение коэффициента истечения сопла, характерное для реальных конкретных условий его работы.

В процессе работы расходомерного устройства температуры рабочей и окружающей сред не остаются строго постоянными, а всегда изменяются в некоторых пределах. Наличие разности температур между стенкой канала и рабочим телом неизбежно порождает теплообменный процесс. Теплообмен с окружающей средой вызывает деформацию полей плотности и скорости в потоке газа, протекающем через контрольное сечение сопла, и тем самым обуславливает изменение величины коэффициента истечения.

Опытные данные о влиянии фактора неизотермичности на профиль скорости в турбулентном ядре пограничного слоя, взятые из работ [7] и [8] представлены на рис.1. Линиями на графике представлены результаты расчета по формуле (6), взятой из [9]:

$$w_i = 1 + \frac{1}{\chi} \sqrt{\frac{C_f}{2}} \ln \zeta_1 + \frac{1 - \psi_h}{4\chi^2} \frac{C_f}{2} \ln^2 \zeta_1 \quad (6)$$

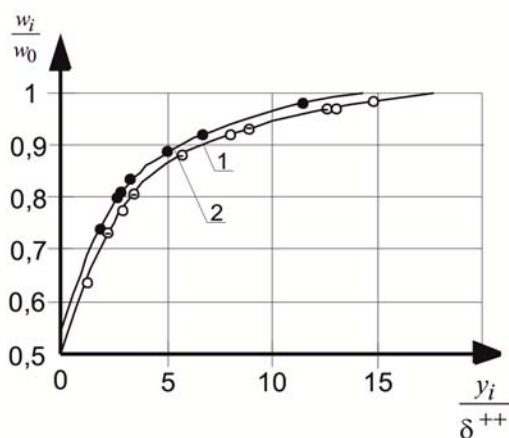


Рис. 1 - Влияние неизотермичности на профиль скорости в турбулентной части пограничного слоя. Линия – расчет: 1) $\psi_h=1$; 2) $\psi_h=0,2$; точки – эксперимент: о - измерение трубкой ПИТО, $\psi_h=1$

Приведенные на рис.1 графики позволяют сделать вывод о том, что выражение (6) удовлетворительно описывает распределение скоростей в турбулентном ядре пограничного слоя при неизотермических условиях течения (об этом свидетельствует неплохое согласование опытных точек с расчетными линиями) и о том, что фактор неизотермичности не очень сильно влияет на кинематическую структуру потока в области турбулентного ядра.

Толщина вытеснения δ^* , входящая в выражение (1) для коэффициента истечения, обычно представляется выражением

$$\delta^* = \int_0^{\delta} \left(1 - \frac{\rho w_x}{\rho_0 w_0} \right) \left(1 - \frac{y}{r_0} \right) dy, \quad (7)$$

где ρ и w_x – местные значения плотности газа и скорости потока на расстоянии y от стенки, а ρ_0 и w_0 – те же параметры на оси канала; y – текущая поперечная координата; r_0 – радиус контрольного сечения сопла, которое после несложных преобразований можно привести к следующему, более информативному виду:

$$\delta^* = \int_0^{\delta} \left(1 - \frac{w_x}{w_0} \right) \frac{\rho}{\rho_0} \left(1 - \frac{y}{r_0} \right) dy + \int_0^{\delta} \left(1 - \frac{\rho}{\rho_0} \right) \left(1 - \frac{y}{r_0} \right) dy \quad (8)$$

Первое слагаемое правой части выражения (8), отображающее распределение скоростей в турбулентном ядре пограничного слоя, как было отмечено, слабо зависит от фактора неизотермичности, зато второе, отображающее распределение плотности рабочего тела в турбулентном ядре находится в существенной от него зависимости.

Подставляя в (8) известный интеграл Крокко (9):

$$\frac{\rho_0}{\rho^*} = \psi_h + (1 - \psi_h) \frac{w_x}{w_0}, \quad (9)$$

получаем выражение для расчета толщины вытеснения δ^* , динамического пограничного слоя в неизотермических условиях.

Результаты расчетов δ^* и коэффициентов истечения расходомерного сопла α для неизотермических условий течения контролируемой среды, при $\psi_h = T_w/T_0 = (0,105 \div 0,95)$ приведены в таблице 1.

Анализ результатов расчета позволяет сделать вывод о том, что фактор неизотермичности может оказывать существенное влияние на коэффициенты истечения расходомерных сопел, а следовательно на метрологические характеристики расходомеров переменного перепада давления, поскольку в условиях теплоотдачи от контролируемой среды через преобразователи расхода при одних и тех же перепадах давления

будут проходить различные по величине объемные расходы газа в зависимости от ψ_h . Коэффициенты истечения расходомерных сопел за счет неизоэтермических условий течения рабочих сред может иметь отклонения от нормальных своих значений до 20%, такова же примерно будет и ошибка в определении величины расхода при неучете указанного фактора. Об этом свидетельствуют так же графики на рис.2 и рис.3.

Таблица 1 - Результаты расчетов δ^* и коэффициентов истечения расходомерного сопла α для неизоэтермических условий течения контролируемой среды

T_w/T_0	δ^*/r_0	δ^*/r_0	α
0,95	0,00881	0,0927	0,824
0,75	0,0734	0,0973	0,853
0,58	0,0597	0,1029	0,8806
0,369	0,0407	0,1102	0,9186
0,266	0,0304	0,1143	0,9392
0,261	0,0236	0,1171	0,9528
0,149	0,0196	0,1187	0,9608
0,130	0,0183	0,1193	0,9634
0,112	0,017	0,1196	0,9660
0,105	0,0165	0,120	0,9670
0,0981	0,016	0,1202	0,9680
0,0921	0,0156	0,1205	0,9668
0,087	0,0151	0,1206	0,9698
0,0827	0,0147	0,1208	0,9706
0,0794	0,0144	0,1209	0,9712
0,0760	0,014	0,1211	0,9720
0,0734	0,037	0,1212	0,9726
0,0712	0,0134	0,1213	0,9732
0,0692	0,0131	0,1215	0,9738
0,0674	0,01229	0,1216	0,9742

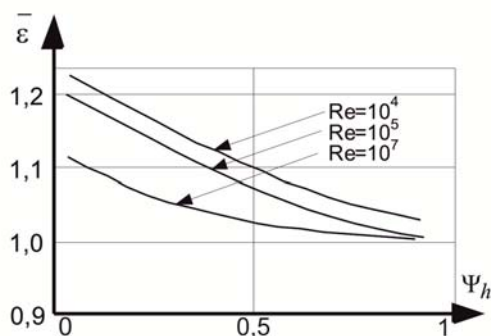


Рис. 2 - Влияние существенной неизоэтермичности на коэффициент расхода сопла

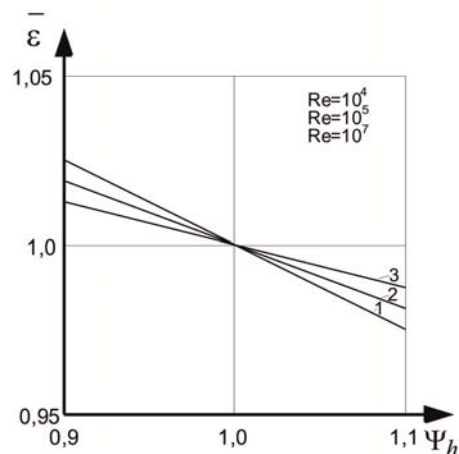


Рис. 3 - Зависимость величины коэффициента расхода от параметра ψ_h , изменяющегося в пределах от 0,9 до 1,1

Литература

1. Фафурин В.А. и др. Анализ параметров численных методов при расчете метрологических характеристик расходомеров на базе стандартной диафрагмы / В.А. Фафурин, В.В. Фефелов, И.А. Яценко// Вестник Казан. технол. ун-та - 2011., №23.-С.136-141.
2. Ившин В.П. Расчет расхода газожидкостной смеси в горизонтальном трубопроводе / В.П. Ившин, М.Ю. Перухин// Вестник Казан. технол. ун-та -2011.-Т.14, №18.-С.164-168.
3. Кузьмин В.В. и др. Трансформация значений коэффициентов истечения расходомерных сопел под воздействием турбулизации потоков контролируемых сред /В.В. Кузьмин, А.А. Гайнуллина, Р.Р. Галямов, Р.К. Нургалиев, А.В. Чупаев// Вестник Казан. технол. ун-та - 2013., №1.-С.76-79.
4. ГОСТ 8.586.1-2005 Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. М.: Стандартинформ 2006.
5. Фафурин А.В. и др. Современные методы и средства измерений расхода газа / А.В.Фафурин.-М.: ВНИИКИ издательство «Стандартов», 1977. - 71 с.
6. Фафурин А.В. Интегральные характеристики турбулентного пограничного слоя при наличии продольного градиента давления / А.В. Фафурин; «Труды КАИ». – Казань. – С. 51-60.
7. Белянин Н.И. Экспериментальное исследование трения и теплообмена при течении газа в трубе / Н.И. Белянин. «ПМТФ». – 1964. - № 4. – С. 112-122.
8. Миронов Б.Л. и др. Измерение скорости в пограничном слое высокотемпературного газа электроннооптическим методом / Б.Л. Миронов. «ГИВ», - 1967. - № 2. – С. 81 – 89.
9. Леонтьев А.И., Миронов Б.П., Фафурин А.В. Экспериментальное исследование турбулентного теплообмена в начальном и стабилизированном участках цилиндрической трубы в условиях существенной неизоэтермичности.-Инж.-физ.журн., 1969, т.16, №4, с.603-609.